

# TEAMPROJEKT

Data Science in der Produktion zum Aufbau von Qualitätsregelkreisen

## ABSTRACT

Ganzheitlicher Ansatz zur Analyse von Zahnrädern mit Hilfe von Messungen, Simulationen, Vorhersagemodelle und Korrelationsanalysen zur Verbesserung der Produktionsqualität und Identifizierung weiterer Forschungsansätze.

Beyer, Grommes,  
Neumann, Siewe und  
Özen

WBK Institut für  
Produktionstechnik

## Einleitung

Die letzten Wochen durften wir uns innerhalb unseres Teamprojektes “Data Science in der Produktion zum Aufbau von Regelkreisen” mit dem Qualitätsmanagement von Zahnrädern beschäftigen. Dieses Artefakt soll dazu dienen unseren Wissenstand, sowie Erkenntnisse und grundsätzliche Herangehensweisen zu erklären und zu dokumentieren. Wir haben unser Projekt in 3 Hauptabschnitte gegliedert und umgesetzt. Die verschiedenen Ansätze waren die Messungen am Frencio-Prüfstand, die Simulation über die Reany Software sowie die geometrische Analyse der Punktwolken. Die Ergebnisse der Projektabschnitte wurden am Ende vereinigt und bilden die Basis unseres neuronalen Netzes.

## Messungen am Frenco-Prüfstand

Im Rahmen des Teamprojektes wurden Messungen zur Paarung von Zahnrädern am Frenco-Prüfstand durchgeführt. Bei den Zahnrädern handelte es sich um Zahnräder vom Typ Z13 bzw. Z19, wobei die Ziffer die Anzahl der Zähne repräsentiert. Es waren jeweils 100 Zahnräder der Typen Z13 und Z19 vorhanden, wobei jedes Zahnrad eine eindeutige Gravur hatte und somit gut unterscheidbar war. Dadurch ergaben sich insgesamt 10.000 mögliche Paarungen. Bei den Messungen wurde jeweils ein Zahnrad vom Typ Z13 mit einem Zahnrad vom Typ Z19 abgerollt, um mögliche Abweichungen festzustellen. Das Ziel der Versuchsreihe bestand darin, herauszufinden, welche Zahnradpaarung minimale Fehler in Bezug auf bestimmte Parameter verursacht. Dabei wurden insbesondere die Parameter Wälzfehler ( $F_i$ ) und Wälzsprung ( $f_i$ ) in Vorwärts- und Rückwärtsrotation betrachtet. Andere Parameter wurden in der Dokumentation nicht näher behandelt.

Im Rahmen des Versuchsaufbaus wurden insgesamt 100 Messungen durchgeführt, bei denen jeweils ein Z13-Zahnrad mit einem Z19-Zahnrad kombiniert wurde. Um eine möglichst gleichmäßige Abdeckung des Versuchsraums sicherzustellen, wurde die x-Achse des Koordinatensystems zur Nummerierung der Z13-Zahnräder und die y-Achse zur Nummerierung der Z19-Zahnräder verwendet. Jede der 100 Messungen wurde durch einen grünen Punkt im Koordinatensystem dargestellt. Zum Beispiel wurde die Zahnradpaarung (Z13: 1, Z19: 2) als grüner Punkt bei den Koordinaten ( $x = 1$ ,  $y = 2$ ) markiert, da diese Paarung in den 100 Messungen erfasst wurde. Durch die rasterartige Struktur des Koordinatensystems konnten mögliche Lücken im Versuchsraum identifiziert und in weiteren Tests abgedeckt werden.

Nicht markierte Bereiche entsprachen Paarungen, die in den 100 Messungen nicht erfasst wurden. Es wurde angestrebt, den Versuchsraum weitgehend gleichmäßig abzudecken, indem zuerst eine Zufallsauswahl von 100 Stichproben erfolgte und anschließend das Raster verwendet wurde, um möglicherweise nicht abgedeckte Segmente zu erfassen. Aufgrund der kleinen Stichprobengröße konnte kein ActiveLearning-Ansatz implementiert werden. Stattdessen wurde manuell ermittelt, welche weiteren Messungen einen hohen Informationsgehalt liefern könnten, indem Bereiche identifiziert wurden, die noch nicht ideal abgedeckt waren.

Um eine Vergleichbarkeit der Paarungen aus den Frenco-Messungen mit den Werten der Reany-Software zu ermöglichen, wurde ein Python-Skript entwickelt. Dieses Skript liest die entsprechenden Paarungen aus den 100 vorhandenen Frenco-Messungen ein und suchte in den Excel-Tabellen der Reany-Messungen nach den relevanten Zahnrädern vom Typ Z13 und Z19. Sobald diese gefunden wurden, wurden die Frenco-Messungen mithilfe der Reany-Messungen reproduziert und anschließend eine Korrelationsanalyse zwischen den Matchings aus den Reany-Daten und den Frenco-Daten durchgeführt.

Im allgemeinen Versuchsaufbau traten jedoch einige Probleme auf. Im Nachhinein wurde festgestellt, dass das Einspannverfahren der Zahnräder auf dem Prüfstand ungenau war. Die sogenannte M1-Schraube wurde bei den Messungen zu fest angezogen, was die Messwerte beeinflusste. Es konnte auch nicht festgestellt werden, mit welchem Drehmoment (Nm) die Schraube angezogen wurde. Darüber hinaus hatten auch andere Personen Zugang zum Messraum, was bedeutet, dass Änderungen der Versuchsparameter durch Dritte nicht ausgeschlossen werden können. Da am Frencó-Prüfstand auch andere Messungen durchgeführt wurden, musste in einem Fall auch die Tarierung des Prüfstands erneut durchgeführt werden.

## Reany Software

Um nicht jedes Zahnrad am Franco-Prüfstand ablaufen lassen zu müssen, nutzen wir eine Simulationssoftware. Diese Software simuliert unseren Prüfstand, auf dem wir die Messungen der Z13/Z19-Paare durchgeführt haben. Allerdings kann die Software nur Aussagen über einzelne Zahnräder treffen und ist nicht für die Simulation einer Kombination aus zwei Zahnrädern geeignet. Vereinfacht ausgedrückt wird jedes Zahnrad mit dem dazugehörigen Meisterrad abgerollt, um Aussagen über die Qualität des Rades zu treffen.

## Genereller Ablauf

Die Software arbeitet mit den gemessenen Punktwolken des Alicona-Messgeräts. Die Daten werden in einen MATLAB-Code eingelesen, der aus den Wolken sechs Schnitte erzeugt. Gleichzeitig werden die Punktwolken am Spandorn ausgerichtet (auf dieses Thema wird später noch eingegangen). Der Output dieses Codes sind die Schnitte, die mit dem CutLayerConverter in die Reany-Software eingelesen werden können.

Als Output der Reany-Software wird eine CSV-Datei generiert, aus der eine Vielzahl von simulierten Daten über das jeweilige Zahnrad ausgelesen werden kann.

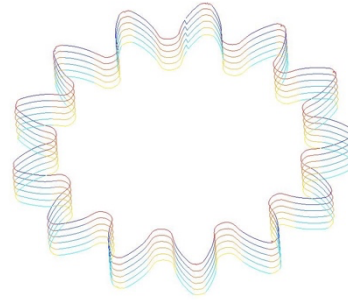
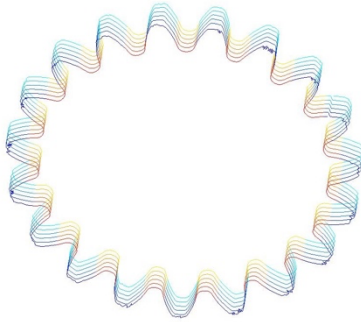
## Unsere Datengrundlage

Wir haben die Reany-Software auf einem Laptop des KIT genutzt (ID: 0001 69051812). Die Software war bereits vorinstalliert, und der entsprechende MATLAB-Code, der die Schnitte erstellt, war ebenfalls vorhanden.

Um den Code zu nutzen, haben wir die Punktwolken, die zuvor als TXT-Dateien vom Alicona-Rechner im Institut bezogen wurden, in den Input-Ordner (der im Schnellzugriff-Menü angehängt ist) geladen.

Mit dem Code "run\_auto.m" (wichtig: Dieser Code befindet sich im CutLayerGenerator. Es gibt einen anderen Code auf dem Laptop mit dem gleichen Namen, der jedoch nicht funktioniert!) wurden aus allen gespeicherten Dateien neue TXT-Dateien erstellt, die die Schnitte enthalten. Die neuen Dateien sind dann im Output-Ordner zu finden (der ebenfalls im Schnellzugriff angehängt ist).

Es ist wichtig anzumerken, dass wir den MATLAB-Code für die Schnitte nicht verändert haben. Wir haben denselben Code sowohl für die Z13- als auch für die Z19-Zahnräder verwendet und somit die entsprechenden Schnitte erstellt.



Im zweiten Schritt wird dann eine Batch Datei verwendet. Diese ist auf dem Desktop des Laptops zu finden und nennt sich „Schleife.bat“. Diese Schleife dient dazu, die in dem Output Ordner liegenden Schnitte in den CutLayerConverter und danach in die Reany zu laden. Dazu werden vorkonfigurierte InspectionPlans in die jeweilige Software geladen und als Ergebnis wird dann eine csv-Datei mit all den simulierten Werten im CSV-Ordner (ebenfalls am Schnellzugriff angehängt) abgelegt. Im Folgenden sind unsere jeweiligen InspectionPlans, die wir benutzt haben, um die Z13 und die Z19 Zahnräder zu simulieren.

<pre>[_Inifile_] Unicode = true  [GearBaseValues] BallDiameter = 0.6 DoB = 6.488 HelixAngle = 0 Module = 0.28 NumberOfTeeth = 19 PressureAngle = 20 RootFormDiameter = 4.9 TipDiameter = 6.05 ToothWidth = 0.625  [GearMeasuringValues] HelixEvaluationAreaBegin = 0 HelixEvaluationAreaEnd = 0.625 HelixMeasuringAreaBegin = 0 HelixMeasuringAreaEnd = 0.625 HelixMeasuringPosition = 5.7 ProfileEvaluationAreaBegin = 5.32 ProfileEvaluationAreaEnd = 5.93 ProfileMeasuringAreaBegin = 5.32 ProfileMeasuringAreaEnd = 5.93 ProfileMeasuringPosition = 0.3125</pre>	<pre>[_Inifile_] Unicode = true  [GearBaseValues] BallDiameter = 0.6 DoB = 4.76019 HelixAngle = 0 Module = 0.28 NumberOfTeeth = 13 PressureAngle = 20 RootFormDiameter = 3.22 TipDiameter = 4.424 ToothWidth = 0.625  [GearMeasuringValues] HelixEvaluationAreaBegin = 0 HelixEvaluationAreaEnd = 0.625 HelixMeasuringAreaBegin = 0 HelixMeasuringAreaEnd = 0.625 HelixMeasuringPosition = 3.864 ProfileEvaluationAreaBegin = 3.63 ProfileEvaluationAreaEnd = 4.35 ProfileMeasuringAreaBegin = 3.63 ProfileMeasuringAreaEnd = 4.35 ProfileMeasuringPosition = 0.315</pre>
--	---

Die erstellten CSV-Dateien haben wir dann als Datengrundlage für unseren Code genutzt. Zusätzlicher Hinweis: Um den CutLayerConverter zu öffnen muss an der Batch-Datei das —silent entfernt werden. Dann öffnet sich die Oberfläche und man kann manuell den InspectionPlan eingeben, bzw. gegebenenfalls aufkommende Fehler beheben.

## Datengetriebene Analyse (geometrische Analyse)

Im ersten Schritt wurde die vorhandene Datenbasis analysiert, die aus 100 Punktwolken für Z19-Zahnräder und später 200 Punktwolken für Z13-Zahnräder bestand. Diese Daten wurden mithilfe der Alicona-Software simuliert und wurden als gegeben angesehen. Nach der Visualisierung der Punktwolken mit Open3D wurden geometrische Merkmale, wie Größe und Struktur der Zähne, extrahiert. Die Beschaffenheit und Struktur der einzelnen Zähne wurden als relevante Einflussfaktoren für die zu minimierende Zielgröße, die Drehwegabweichung eines Zahnrads, betrachtet. Es war jedoch das Wissen über die Gewichtung der verschiedenen Eigenschaften auf die Drehwegabweichung begrenzt. Es wurde erkannt, dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, um die Analyse gezielter durchführen zu können.

Zuvor wurde das vorhandene CAD-Modell für Z13 und Z19 von den Spanndornen freigeschnitten, d.h., es wurden parallel zum Zahnrad Ebenen eingezeichnet, um irrelevante Koordinaten zu entfernen. Ausgehend vom Zentrum der Punktwolke wurde eine relative Grundlinie festgelegt, anhand derer jedem Zahn eines Zahnrads ein Winkelintervall zugewiesen werden konnte, das 19/360 bzw. 13/360 Grad entspricht. Auf diese Weise konnte jeder Zahn einer Punktwolke iterativ mit dem entsprechenden Zahn im CAD-Modell verglichen werden.

Dabei wurden die mittlere Abweichung eines Zahns vom CAD-Modell, die Varianz dieser Abweichung sowie die maximale und minimale Abweichung eines Zahns innerhalb eines Zahnrads vom CAD-Modell extrahiert.

## Forecasting

Um die gewonnenen Erkenntnisse und Analyseschritte für zukünftige Produktionsprozesse nutzbar zu machen, wurden im letzten Schritt verschiedene Ansätze des Forecastings verfolgt. Es wurden ein lineares Regressionsmodell und eine Gradient-Boosting-Regression mit Hilfe von sklearn trainiert. Beide Ansätze lieferten vielversprechende Ergebnisse, jedoch war es uns noch nicht möglich, die genauen Werte und Unterschiede ausführlich zu erklären.

Als dritter Ansatz wurde ein neuronales Netzwerk entwickelt, das äußerst vielversprechende Ergebnisse lieferte. Zum Beispiel ergaben sich für mehrere Vorhersagen  $R^2$ -Werte (der erklärte Anteil eines prognostizierten Werts) von 0,6. Hierbei ist jedoch auch die Erklärung noch offen und erfordert weitere tiefgreifende Analysen.

Zusammenfassend können die Forecasting-Modelle als vielversprechend betrachtet werden, was weitere Forschungsansätze ermöglicht, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Die nächsten Schritte sollten sich insbesondere mit der Vorhersage der Qualität des Matchings zwischen Z13- und Z19-Zahnrädern befassen. Hierfür ist eine umfangreiche Datenbasis und insbesondere präzisere Franco-Daten erforderlich, auf die ich leider keinen Zugriff hatte. Wir sind jedoch davon überzeugt, dass mit zusätzlichen Trainingsdaten und einer detaillierten technischen Analyse präzise Vorhersagen über das Match zweier Zahnräder möglich sind, was langfristig zu einer Reduzierung von Produktionsausschüssen führen kann.

# Korrelationsanalyse

## Funktionsbeschreibung

Der vorliegende Code analysiert die multilineare Korrelation zwischen den Reany-Daten und den Frenc-Messungen auf Basis der erfassten Mess- und Simulationsdaten. Diese Untersuchung ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen den beiden Datensätzen zu identifizieren und ihre Beziehung genauer zu verstehen.

## Erklärung der Ausgabe:

Als Eingabewerte dienen die Werte  $F_i$  links und rechts der beiden Zahnräder. Der abhängige Parameter, der in dieser Analyse betrachtet wird, ist der Wälzfehler. Durch die Betrachtung dieses Parameters können Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Eingabewerte auf die Qualität der Zahnräder gezogen werden.

Die Ausgabe mit dem Namen "Coefficients" beschreibt die Rate, mit der der Wälzfehler steigt, wenn die Frenc-Messung um 1% ansteigt. Diese Information ist hilfreich, um zu verstehen, wie sich Änderungen der Eingabewerte auf den abhängigen Parameter auswirken.

Die Ausgabe "Intercept" liefert einen prognostizierten Wert für den Wälzfehler, wenn alle abhängigen Eingabeparameter den Wert 0 haben. Dieser Wert gibt Aufschluss darüber, wie sich die Qualität der Zahnräder verändert, wenn alle anderen Einflussfaktoren neutral sind.

## Interpretation der Ergebnisse

Die Parameter Einzelflankenwälzabweichung ( $F'_{i re}$  und  $F'_{i li}$ ), sowie die Wälzabweichung einzelner Flanken von Zahn zu Zahn ( $f'_{i re}$  und  $f'_{i li}$ ) haben wir als besonders relevant eingestuft und haben uns auf diese Parameter fokussiert. (Vgl. Paper "Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using Monte Carlo simulation and Skin Model Shapes for Zero Defect Manufacturing of micro gears", S.3)

Die Tatsache, dass der "Intercept" sehr nahe bei Null liegt, deutet darauf hin, dass eine signifikante Korrelation zwischen den Reany-Daten und den Frenc-Messungen besteht. Dies bedeutet, dass eine Verbindung zwischen den beiden Datensätzen besteht und Veränderungen in den Eingabewerten eine Auswirkung auf den Wälzfehler haben können.

Darüber hinaus zeigt der "Coefficients"-Wert einen klaren Zusammenhang zwischen den Messwerten und den Reany-Simulationen. Dies unterstützt die Annahme, dass die beiden Methoden eine ähnliche Tendenz bei der Vorhersage des Wälzfehlers aufweisen.

Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass aufgrund der begrenzten Datenbasis und möglicher Messfehler in den Frenc- und Reany-Daten die allgemeine Aussagekraft der Ergebnisse relativ niedrig ist. Es wird empfohlen, weitere Daten zu sammeln und die Korrelation genauer zu beleuchten, um eine robustere Analyse und verlässlichere Schlussfolgerungen zu ermöglichen.



## Nächste Schritte

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Korrelation könnten als Grundlage dienen, um mithilfe eines neuronalen Netzes mögliche Zahnradpaarungen vorzuschlagen. Hierfür ist es jedoch erforderlich, zusätzliche Daten zu erheben und die Korrelation genauer zu untersuchen. Dieser Ansatz könnte eine vielversprechende Möglichkeit bieten, die Qualität der Zahnräder durch eine optimierte Auswahl der Zahnradpaarungen zu verbessern.

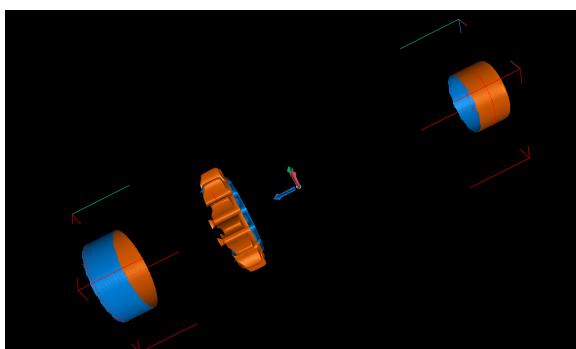
## Spanndorn Ausrichtung

### Erklärung

Bei der Vermessung der Zahnräder mit dem Alicona-Messgerät wird eine präzise Einmessung unter Verwendung des Maschinenkoordinatensystems der Alicona durchgeführt. Das Maschinenkoordinatensystem bietet eine genaue Orientierung und Referenz für die Vermessung der Zahnräder.

Um die Zahnräder mithilfe der Reany-Software zu simulieren, werden Schnitte der Punktwolke verwendet. Durch diese Simulation können die Zahnräder virtuell abgerollt werden, um ihr Verhalten und ihre Eigenschaften zu analysieren. Dies ist jedoch eine Herausforderung aufgrund der unterschiedlichen Koordinatensysteme und der Ausrichtung im Raum. Um eine präzise Simulation zu gewährleisten, sind senkrechte Schnitte der Zahnräder erforderlich.

Aufgrund möglicher Abweichungen bei der Einmessung, z.B. durch den Spanndorn, ist es erforderlich, eine neue Achse festzulegen. Hierbei wird die Mittelgerade zwischen den Spanndornringen und dem Zahnrad als Referenzachse definiert. Dadurch kann gewährleistet werden, dass senkrechte Schnitte erzeugt werden, die für die Simulation von großer Bedeutung sind.



### Umsetzung

Um die genaue Umsetzung dieses Vorgehens zu beschreiben, wurde eine ausführliche Dokumentation von den Sirona-Experten erstellt. Diese enthält detaillierte Informationen und Anleitungen, um sicherzustellen, dass die Simulation der Zahnräder mit hoher Präzision und Genauigkeit erfolgt. Die Dokumentation ist separat abgelegt und bietet eine wertvolle Ressource für die erfolgreiche Durchführung der Simulation.